

MEMS & high speed vision

development and application to reverse-engineer Drosophila flight control

Doctoral Thesis**Author(s):**

Graetzel, Chauncey

Publication date:

2008

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005742422>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

DISS. ETH NO. 18096

**MEMS & High Speed Vision:
Development and Application to
Reverse-engineer *Drosophila* Flight Control**

A dissertation submitted to the

ETH ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

presented by

Chauncey Graetzel

Dipl. Ing. Microtech., EPFL

Born on September 29, 1980

Citizen of St-Sulpice, Vaud

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Bradley Nelson examiner

Dr. Steven Fry, co-examiner

Prof. Dr. Xinyan Deng, co-examiner

2008

Abstract

In this thesis, I developed novel robotic tools and applied them to reverse-engineer insect flight biomechanics and flight control. The robotic tools are not only *novel technologies* that provide access to previously unmeasurable data, but also *analytical tools* that provide a new way to interpret the data.

The model organism I studied was the fruit fly, *Drosophila melanogaster*. Fruit flies achieve an awe-inspiring control of their inherently unstable flight using only limited neural resources. They therefore represent an important model for the understanding of sensorimotor pathways and have attracted the attention of engineers developing micro robotic devices at similar Reynolds numbers.

From a technological perspective, the spatial and temporal scales of flight control in *Drosophila* are challenging. This thesis therefore resulted in product-level tools that pushed technological limits further to meet the demands of the biological application.

Concretely, three new tools were developed: MEMS micro force sensors, high speed vision systems, and visual flight arenas. The MEMS sensors provide a leap in the resolution ($< 1 \mu\text{N}$), bandwidth ($> 1 \text{ kHz}$) and automation of biological force measurements. The high speed vision implementation provides a new tool to extract wing kinematics in real time at sampling rates above 6 kHz, which is several times faster than common vision-based tracking devices. Finally, the flight arenas were developed to stimulate the fly with precise visual patterns at high sampling rates.

Together, these three tools form a highly automated biorobotic platform that allows the exploration of open and closed-loop paradigms in flight control research. Furthermore, the developed methods have been extended to several complementary projects, proving their general value.

To apply these tools and study the sensorimotor pathways of *Drosophila*, I employed a system's level approach. This "black box" strategy requires both a precise control of the inputs and detailed knowledge of the outputs of the analyzed system. Tethered approaches, where the fly is mechanically held in place, ideally provide these

desired conditions because the sensory input is well defined and the response can be measured in greater detail than in free flight approaches.

The approach was applied to four main studies of flight control: 1) I experimentally validated a well-established aerodynamic model of flapping flight by comparing it for the first time with instantaneous flight forces. 2) I studied lift control by measuring its frequency response and characterizing it with system identification tools. 3) I analyzed speed control by concurrently measuring pitch, thrust and lift responses. The results were compared to free-flight experiments. 4) I dynamically coupled a mobile robot with the behavior of the fly and explored the effects of various coupling strategies.

In conclusion, these applications provide an overall advancement in the understanding of the biophysics and neural control mechanisms of biological flapping flight. From an engineering perspective, the technologies developed for these experiments have expanded the measurement possibilities at low Reynolds numbers and high temporal frequencies.

Sommaire

Dans cette thèse, de nouvelles microtechniques robotiques sont développées et appliquées à l'analyse de la biomécanique et du contrôle de vol d'insectes.

Ces techniques robotiques ne sont pas seulement des *nouvelles technologies* donnant accès à des mesures jusqu'alors inatteignables, mais aussi des *techniques d'analyse* qui permettent de caractériser l'organisme biologique de façon nouvelle.

Le modèle biologique étudié est la *Drosophile melanogaster*. Celle-ci réalise un contrôle précis de son vol malgré des conditions instables et des ressources neuronales limitées. Pour ces raisons, la *Drosophile* est un modèle important pour la compréhension du contrôle de vol biologique et a attiré l'attention d'ingénieurs développant des micro-robots volants.

L'analyse de phénomènes biologiques en question a nécessité le développement de trois nouveaux outils repoussant les limites technologiques: Premièrement, des capteurs de force MEMS ont été intégrés dans le système expérimental, permettant une amélioration de la résolution ($< 1 \mu\text{N}$), de la bande-passante ($> 1 \text{ kHz}$) et du degré d'automatisation de mesures de forces en biologie. deuxièmement, un système de vision a été développé permettant l'analyse en temps réel de la cinématique du battement d'ailes à plus de 6000 images par secondes, ce qui représente une amélioration significative par rapport aux méthodes existantes. Finalement, une arène de vol a été développée afin de stimuler visuellement la *Drosophile* à des fréquences supérieures à celle de son organe visuel (ca. 150 Hz), tout en couvrant la majorité de son champ visuel.

La combinaison des ces développements forment une plateforme biorobotique hautement automatisée permettant l'analyse du contrôle de vol biologique en boucle ouverte ou fermée. Les procédés ont aussi été étendus à plusieurs projets annexes, démontrant leur large champ d'application.

Afin d'appliquer ces outils à l'analyse du contrôle de vol biologique, j'ai utilisé une approche de "biologie du système". Cette approche considère l'organisme comme une boîte noire et nécessite donc une connaissance détaillée des entrées et sorties. Les

outils développés dans le cadre de cette thèse sont idéaux pour une telle analyse.

L'approche de "biologie du système" a été appliquée dans quatres principales études: 1) Pour la première fois, un modèle aérodynamique du vol a été validé expérimentalement à travers des mesures instantanées de forces. 2) Le contrôle de la portance a été caractérisé par sa réponse fréquentielle et analysé à l'aide d'outils d'identification du système. 3) Le contrôle de vitesse a été caractérisé en mesurant la portance, la poussée et le tangage en réponse à des stimulations visuelles de vitesse. 4) Un robot mobile a été dynamiquement couplé au comportement de la *Drosophile* afin d'analyser les effets de différentes stratégies de couplage.

En conclusion, ces applications contribuent à une meilleure compréhension des mécanismes bio-physiques et neuronaux liés au contrôle du vol biologique. Du point de vue technique, les outils développés ont ouvert de nouvelles possibilités en matière de mesures à haute résolution et à hautes fréquences.